中国生态农业学报 2016 年 10 月 第 24 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2016, 24(10): 1356−1363

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160153

栽培年限对新建日光温室番茄生长及土壤供氮能力的影响*

王士超 陈竹君** 蔡红明 周建斌

(西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 杨凌 712100)

摘 要 为评价栽培年限对新建日光温室土壤供氮能力的影响，采用盆栽生物耗竭试验和间歇淋洗好气培养法相结合的方法研究了陕西杨凌不同年限新建日光温室(温室建造前的大田及温室建造后第2年和第3年取样)耕层(0~20 cm)土壤供氮能力的变化。结果表明：随着温室栽培年限的增加，番茄生物量和吸氮量与温室栽培前相比均显著增加，其中栽培年限为第 2 年和第 3 年的番茄株高、茎粗、地上及根系生物量、叶片 SPAD 值均显著高于温室建造前，而第 2 年和第 3 年间各指标无显著差异；第 2 年和第 3 年温室的番茄吸氮量分别是建造前大田的 2.53 倍和 3.01 倍；与种植前土壤相比，第 3 年温室土壤有机质、全氮和速效养分含量均显著增加，第 2 年及第 3 年温室土壤可矿化氮量分别是建造前大田的 2.84 倍和 2.96 倍，说明随栽培年限的增加，温室土壤供氮能力显著增强。相关分析表明，土壤有机质、全氮、初始矿质氮及累积矿化氮量与番茄吸氮量间呈极显著正相关关系，其中以土壤累积矿化氮量与番茄吸氮量间的相关系数最大，说明这些指标均可用于评价土壤供氮能力。随栽培年限的增加，日光温室土壤供氮能力显著提高，生产中应随温室栽培年限增加适当降低氮肥用量。

关键词 日光温室 栽培年限 土壤供氮能力 吸氮量 生长 番茄
中图分类号: S626.5; S135.6+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)10-1356-08

Effect of cultivation year on tomato growth and soil nitrogen supply ability of newly built solar greenhouses*

WANG Shichao, CHEN Zhujun**, CAI Hongming, ZHOU Jianbin

(College of Natural Resources & Environment, Northwest A&F University / Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract Solar greenhouse, developed by China's farmers and scientists in the early 1980s, makes it possible to produce vegetables during winter without additional heating and lighting in large parts of North China. Vegetable cultivation in greenhouses has high profitability. This has led to a rapid increase in the land area used for solar greenhouse production over the last three decades. Within the greenhouse system, it is common to overuse inorganic fertilizers and manure in vegetable production. It increases the organic matter in soil and the accumulation of nutrients and salts in the soil. The accumulation of nutrients in solar greenhouse soils, especially nitrate, has high environmental risks. Optimum application of nitrogen (N) fertilizer is critical for resolving this problem. Mineralized N in soils during crop growth supports a high rate of N uptake by crop. Therefore understanding nitrogen (N) mineralization in solar greenhouse soils with different cultivation histories is important for rational N fertilization. However, most of the studies on soil N mineralization studies have focused on arable

* 国家自然科学基金项目(31372137)、陕西省农业攻关项目(2014K01-14-03)和高等学校学科创新引智计划(B12007)资助
** 通讯作者：陈竹君，主要研究方向为土壤物理化学性状与养分循环。E-mail: zjchen@nwsuaf.edu.cn
王士超，主要研究方向为农田物质循环与环境。E-mail: wangschao@163.com
收稿日期: 2016−02−18 接受日期: 2016−03−28

* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31372137), the Agricultural Project in Shaanxi Province (2014K01-14-03) and the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities of China (B12007).
** Corresponding author, E-mail: zjchen@nwsuaf.edu.cn
Received Feb. 18, 2016; accepted Mar. 28, 2016

soils and little remains known about N mineralization in solar greenhouse soils with different cultivation histories. In this study, the pot depletion method and Stanford and Smith aerobic incubation method were used to evaluate the effects of cultivation years on N supply ability in the 0–20 cm layer of soil under newly-built solar greenhouse with different cultivation years [0 year (before greenhouse construction), 2 and 3 years] of operation in Yangling, Shaanxi. Response of tomato to cultivation years was also investigated. The results showed that tomato height, stem diameter, aboveground and root biomass, leaf SPAD in 2 and 3 years greenhouse were significantly higher than those in field of 0 year greenhouse, while these indexes were not significantly different between 2 years and 3 years greenhouses. Total N uptake of tomato increased with increasing age of solar greenhouse. Total N uptakes in greenhouse soils with 2 and 3 years of cultivation were 2.53 and 3.01 times that of soils before greenhouse construction. Soil organic matter, total nitrogen and available nutrients contents of 3 years solar greenhouse were significantly increased compared with those of field before greenhouse construction. Mineralized N in solar greenhouse soils with 2 and 3 years of cultivation was 2.84 and 2.96 times that of soils before greenhouse construction. It then indicated that as the age of solar greenhouse increased, soil N supply ability increased significantly. The contents of soil organic matter, total N, initial mineral N, and mineralized N were significantly positively related to tomato N uptake. The coefficient between mineralized N and tomato N uptake was highest. It indicated that these indexes could be used to evaluate soil N supply ability, mineralized N was the best one. In order to reduce N loss and increase N use efficiency in the study area, it was concluded that as the age of greenhouses increased, the addition of inorganic N fertilizer should be reduced in solar greenhouse production.
Keywords Solar greenhouse; Cultivation year; Soil nitrogen supply ability; Nitrogen uptake; Growth; Tomato

近年来我国设施栽培发展迅速，2011 年全国设施农业面积约为 400×10^4 hm^2，是 1980 年栽培面积的近 600 倍[1−2]，且仍以每年 10%的速度迅速增加[3]。西北地区是我国设施蔬菜栽培的优势产区之一，仅陕西省日光温室的面积已超过 5.3×10^4 hm^2[2]。然而，近年来日光温室蔬菜栽培中过量施肥问题日益突出，尤以氮肥的过量施用最为严重，一些温室施氮量已超过蔬菜需求量的 5 倍[4−5]。过量施用氮肥不仅造成氮素利用率降低[6−8]、经济效益下降，而且引起硝态氮在土壤中大量累积、蔬菜品质下降等问题[9−10]。因此，如何合理施用氮肥，是日光温室养分管理的重点问题。

土壤供氮能力是确定作物施氮量的重要依据，同时也是土壤供氮水平的重要评价指标。在日光温室长期过量施氮和灌溉条件下，土壤水热条件发生变化，栽培年限必然会影响土壤供氮能力。据刘建霞等[11]对河北省永清县不同栽培年限温室土壤的调查分析，随着黄瓜(*Cucumis sativus* L.)栽培年限的延长，土壤有机质含量持续增加。栽培 13 年的温室与种植前相比土壤全氮含量提高了 2 倍[12]，这无疑提高了土壤供氮能力。因此，只有明晰土壤的供氮状况和作物吸氮规律才能有效提高产量，减少氮素的损失。而目前关于土壤供氮特性的研究主要集中于农田土壤，而日光温室土壤供氮能力方面的研究较少，在连续多年定点监测条件下，栽培年限对土壤供氮能力影响方面的研究尚少见报道。已有的研究多采用“空间代替时间”的研究方法，即一次性大量采集不同栽培年限土壤样品，评价栽培年限对土壤供氮能力的影响[13]。应看到，这一方法虽缩短了研究周期，但由于不同温室施肥状况等存在较大差异，因此，采用“空间代替时间”的研究方法会存在较大的试验误差。因此，有必要定点连续研究(即自温室建棚起，每年采集相应温室土样进行研究)随栽培年限的增加，土壤供氮能力的变化。

研究土壤供氮能力的方法较多，其中生物耗竭法[14]通过连续不断种植植物，评价土壤供氮特性，是评价土壤氮素有效性的基本方法。Stanford 和 Smith[15]提出的间歇淋洗好气培养法，是在室内培养条件下评价土壤供氮能力方面应用最广泛的方法，依据土壤氮矿化势评价土壤供氮能力。因此，本研究以黄土高原南部地区陕西杨凌不同栽培年限日光温室土壤为研究对象，采用生物耗竭试验与间歇淋洗好气培养相结合的方法，评价了随日光温室栽培年限的增加土壤供氮能力的变化，旨在为日光温室栽培系统合理氮素管理提供可靠的依据。

1　材料与方法

1.1　供试土壤

供试土壤采自黄土高原南部陕西杨凌的设施蔬菜栽培基地。当地属大陆性季风气候，海拔约520 m，年均降水量为630 mm左右，主要集中于7—9月，年平均温度为12.9 ℃，土壤类型为塿土。日光温室多建于2009—2010年，温室建造时移去原农田土壤的表层土(0~90 cm)，用于堆砌保温土墙，因此，日光温室内耕层(0~20 cm)土壤养分含量较低，其中土壤有机质、全氮含量分别为8.3 $g\cdot kg^{-1}$和0.59 $g\cdot kg^{-1}$，硝

态氮、速效磷(以P计)和速效钾(以K计)含量分别为21.2 mg·kg^{-1}、5.0 mg·kg^{-1}和123.6 mg·kg^{-1}。除土壤速效钾外，其他养分含量均处于严重缺乏状态。单个日光温室面积多为350~700 m^2，种植的蔬菜品种多为番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)，一般每年10月份左右定植，翌年6月底拉秧；产量多为100~180 t·hm^{-2}，平均产量为145 t·hm^{-2}[16−17]。该区域施用的有机肥多为商品鸡粪和牛粪，年均施用量约142 t·hm^{-2}。化肥以复合肥、尿素和硫酸钾为主，其中氮、磷、钾施用量分别为690 kg·hm^{-2}、720 kg·hm^{-2}和759 kg·hm^{-2}。氮肥和钾肥部分作基肥，其余的作追肥，整地前将磷肥和有机肥(基肥)一次施入土壤。

选取 13 个代表性的日光温室耕层(0~20 cm)土样作为研究对象，其中 10 个温室建于 2009 年，另 3 个建于 2010 年。于种植前及第 2 年和第 3 年蔬菜收获后(即 2009 年、2011 年和 2012 年)取样，温室栽培年限分别为 0 a、2 a 和 3 a，温室数量分别为 1 个、3 个和 10 个。

采集 0~20 cm 土壤样品，每个温室内取 3 个点，组成一个混合土样。将采集的新鲜土样，剔除蔬菜残留物，自然风干后过 2 mm 筛，用于土壤养分指标的测定。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽生物耗竭试验

采用上述土壤样品进行盆栽生物耗竭试验。以番茄为供试作物，连续种植3茬。试验设0年(0 a)、2年(2 a)和3年(3 a)3个处理，每处理重复5次，各处理不施用氮肥，均施用磷肥和钾肥，用量分别为0.15 g(P_2O_5)·kg^{-1}(土)和0.15g(K_2O)·kg^{-1}(土)，其中磷肥用过磷酸钙，钾肥为硫酸钾。

盆栽试验在西北农林科技大学资源环境学院网室中进行，试验用盆钵为内径15 cm，高20 cm的塑料盆(带盆底)，每盆装土1.5 kg。将肥料(过磷酸钙+硫酸钾)与土壤混匀后装盆，然后加入去离子水，使土壤含水量保持在田间持水量的80%。第1茬番茄于2012年的9月24日种植，供试品种为'金棚11号'，每盆直播10粒番茄种子，出苗后及时间苗，每盆定苗5株，生长期间用称重法控制水分含量，灌水为去离子水。11月22日收获(为第1茬)，将番茄按地上部分和根系分开，称量鲜重，烘干后测定植株干重和全氮含量。

试验第1茬结束后，将各试验盆中番茄地上部分剪掉，放入信封中，取盆中土、拣出番茄残根后，过2 mm筛，各自混匀后装入原来的试验盆中，不施用任何肥料，于2013年3月16日至6月10日进行盆栽试验的第2茬，方法与第1茬相同；盆栽试验第3茬于2013年8月30日至11月15日进行。累计种植时间共计222 d。

各阶段生长期间，测定每盆番茄的株高、茎粗和叶绿素含量(采用SPAD仪测定)。于定植后20 d开始，每隔15 d采1次样，每盆选择长势弱、中和强的番茄各1株，取平均值。每茬番茄收获后取试验盆中土1份，用于测定土壤速效氮和全氮含量。

1.2.2 长期好气培养试验

本试验采用方法同Stanford和Smith[15]提出的间歇淋洗好气培养法。称15.00 g(1 mm)风干土样和等质量的石英砂混合，加入少量蒸馏水，湿润后充分混匀；移入50 mL培养器(聚丙烯一次性注射器)中，培养器底部铺6 mm玻璃棉，土样之上盖3 mm玻璃棉，并覆10 g石英砂，以防淋洗过程中土粒飞溅，装好后轻振几下以使土壤填装松紧适度。用100 mL 0.01 mol·L^{-1} $CaCl_2$溶液分4次淋洗土壤，收集淋洗液，测定淋洗液中铵态氮和硝态氮；再浇灌25 mL无氮营养液(0.002 mol·L^{-1} $CaSO_4·2H_2O$, 0.002 mol·L^{-1} $MgSO_4$, 0.005 mol·L^{-1} $Ca(H_2PO_4)_2·2H_2O$, 0.002 5 mol·L^{-1} K_2SO_4)，抽滤(−80 kPa)，以除去土壤中多余水分，用封口膜密封管口，置于35 ℃的恒温培养箱中培养。分别于培养的第0周、1周、2周、4周、6周、8周、10周、12周、14周、16周、18周、20周、22周、24周、26周、28周和30周同上方法进行淋洗，并收集淋洗液，用流动分析仪(德国布朗卢比公司，AA3)测定淋洗液中NO_3^--N和NH_4^+-N含量。

土壤累积氮矿化量为各培养阶段矿化氮量之和。

土壤氮素矿化的单因素指数模型：

$$N_t = N_0(1-e^{-kt}) \quad (1)$$

式中：N_t为培养时间t时氮矿化量(mg·kg^{-1})，N_0为氮素矿化势(mg·kg^{-1})即可矿化氮量，k为矿化速率常数，t为培养时间(d)。

1.3 分析方法

土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量均采用常规分析法。培养结束后，测定土壤矿质氮含量，采用 1 mol·L^{-1} KCl 溶液提取，提取液中矿质氮NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量用连续流动分析仪测定，两者之和为矿质氮含量。将每茬收获的地上茎叶和根系，烘干，磨细，过 0.2 mm 筛后用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，半微量凯氏法测定全氮含量[18]。

1.4 数据处理与分析

采用SAS 8.0对试验结果进行方差分析、相关性分析及显著性测验，用Sigmaplot 12.0绘制图形。

2　结果与分析

2.1　栽培年限对番茄生长的影响

由表 1 可以看出，同一茬番茄株高和茎粗均随生长时间的延长而不断增加，且株高、茎粗与叶绿素含量均表现为 3 a>2 a>0 a。除盆栽第 1 茬株高(定植后 20 d)外，不同栽培年限日光温室土壤 3 茬番茄株高、茎粗和叶绿素含量均表现为 2 a 和 3 a 显著高于种植前(P<0.05)，但 2 a 和 3 a 土壤 3 茬的差异均未达到显著差异水平。

同一栽培年限，番茄各生长指标不同茬存在很大差异。种植前处理，番茄定植后 20 d，除叶绿素含量表现为第 3 茬显著低于第 1 茬和第 2 茬外(P<0.05)，株高和茎粗 3 茬差异不显著。定植后 35 d 表现为第 3 茬株高显著高于前两茬，而叶绿素含量显著低于前两茬(P<0.05)，茎粗在 3 茬之间的差异未达到显著水平。定植后 50 d，仅番茄叶绿素含量第 3 茬显著低于第 2 茬，株高和茎粗 3 茬的差异未达到显著水平。2 a 处理，定植后 20 d 时第 1 茬番茄株高显著低于第 2 茬和第 3 茬，而第 2 茬叶绿素含量明显高于第 1 茬和第 3 茬；定植后 35 d 和 50 d，各生长指标 3 茬之间差异均未达到显著水平。3 a 处理，定植后 20 d，株高和茎粗第 1 茬均显著低于第 2 茬，叶绿素含量则表现为第 2 茬显著高于第 1 茬和第 3 茬；定植后 35 d，除番茄茎粗 3 茬差异不显著，株高第 1 茬显著低于第 2 茬和第 3 茬，叶绿素含量则为第 3 茬显著低于其他两茬；定植后 50 d，株高各茬间差异不显著，茎粗为第 3 茬显著低于第 1 茬，而叶绿素含量第 3 茬显著低于第 1 茬。

表 1　温室栽培年限对不同茬口番茄株高、茎粗及叶绿素含量(SPAD 值)的影响

Table 1　Height, stem diameter and leaf SPAD of tomatoes of different harvests after planting in soils with different cultivation years of greenhouse

定植后天数 Days after planting (d)	温室种植年限 Greenhouse cultivation year (a)	株高 Plant height (cm)			茎粗 Stem diameter (cm)			叶绿素含量 SPAD		
		第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest
20	0	7.9±0.1bA	7.9±0.9bA	7.9±0.8bA	0.13±0.02bA	0.13±0.01bA	0.13±0.01bA	29.7±6.1bA	29.7±0.9bA	7.9±2.1bB
	2	8.9±2.2abB	13.3±3.4aA	13.4±2.2aA	0.20±0.06aA	0.28±0.03aA	0.26±0.06aA	38.2±0.9aB	44.5±2.2aA	13.4±3.9aC
	3	9.8±1.4aB	14.5±2.2aA	13.2±1.4aA	0.20±0.04aB	0.31±0.05aA	0.26±0.04aAB	39.1±1.3aB	45.1±1.4aA	13.2±1.3aC
35	0	11.4±1.4bB	11.4±1.1bB	14.3±1.3bA	0.18±0.01bA	0.18±0.02bA	0.17±0.01bA	21.2±3.0bA	21.1±1.4bA	11.4±3.0bB
	2	13.3±3.7aA	15.4±1.7aA	15.8±3.7aA	0.26±0.07aA	0.40±0.07aA	0.36±0.07aA	34.5±3.9aA	27.4±3.7aA	15.8±3.9aB
	3	14.5±2.4aB	17.1±1.4aA	17.1±2.4aA	0.36±0.10aA	0.47±0.10aA	0.34±0.10aA	34.6±2.4aA	26.3±2.4aA	17.1±2.4aB
50	0	11.9±1.3bA	11.4±1.2bA	11.9±1.3bA	0.29±0.04bA	0.30±0.01bA	0.29±0.04bA	17.1±3.6bAB	22.0±1.3bA	11.9±3.6bB
	2	14.5±3.4aA	15.8±2.4aA	18.2±3.4aA	0.48±0.13aA	0.52±0.00aA	0.32±0.13aA	26.0±6.0aA	28.5±3.4aA	18.2±6.0aA
	3	15.6±2.5aA	16.7±3.7aA	19.8±2.5aA	0.48±0.11aB	0.61±0.07aAB	0.35±0.11aA	27.4±3.6aA	30.1±2.5aA	19.8±3.6aB

同列相同定植后天数数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平，同行数据后不同大写字母表示茬间差异达 5%显著水平。Different lowercase letters for the same day after planting indicate significant differences among different greenhouse cultivation years at 5% (Duncan's multiple comparison test). Different capital letters in a line for the same greenhouse cultivation year indicate significant differences among different harvests at 5% level.

随着栽培年限的延长，番茄生物量呈增加趋势。与 0 a 相比，2 a 和 3 a 处理番茄地上部分和根系的生物量均显著增加，而 2 a 和 3 a 番茄生物量差异不显著(P>0.05)。各栽培年限处理相比，3 a 处理地上部分生物量最大，较 0 a 增加了 462.9%；2 a 处理生物量较 0 a 处理增加了 409.1%。2 a 和 3 a 处理根系生物量较 0 a 处理分别增加了 61.4%和 105.3%。

同一栽培年限，不同茬相比，0 a 处理第 1 茬和第 2 茬番茄地上部分和根系生物量分别为第 3 茬的 3.9 倍、3.3 倍和 1.8 倍、1 倍。2 a 处理番茄地上部分生物量第 2 茬是第 1 茬和第 3 茬的 1.5 倍和 3.8 倍；3 a 处理番茄地上部分生物量第 2 茬是第 1 茬和第 3 茬的 1.9 倍和 5.3 倍，且均显著高于第 1 茬和第 3 茬；而两处理根系生物量 3 茬差异不显著。

2.2　栽培年限对番茄氮素含量和吸氮量的影响

由表 3 可见，栽培年限长的温室，植株地上部分和根系氮素含量均较高。番茄栽培第 1 茬地上部分氮素含量 0 a 处理为 1.29%，2 a 和 3 a 处理分别是它的 1.17 和 1.27 倍；根系氮素含量 0 a 为 0.42%，2 a 和 3 a 处理分别为其含氮量的 1.91 和 2.07 倍。3 茬 2 a 和 3 a 处理番茄地上部分和根系氮素含量均显著高于 0 a，但 2 a 和 3 a 处理差异不显著(P>0.05)。

番茄吸氮量变化在 28.9~251.5 mg·pot^{-1}。从不同栽培年限看，2 a、3 a 处理番茄吸氮量分别是 0 a 的 6.0 和 8.7 倍，差异均达到了显著水平(P<0.05)。3 a 处理番茄吸氮量高于 2 a，但差异未达显著水平

表 2 温室栽培年限对不同茬口番茄地上部分和根系生物量的影响

Table 2 Aboveground and root biomasses of tomato of different harvests in soils with different cultivation years of greenhouse g·pot^{-1}

温室种植年限 Greenhouse cultivation year (a)	地上部分 Aboveground biomass			根系 Root biomass		
	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest
0	1.26±0.28bA	1.06±0.18bA	0.32±0.04bB	0.27±0.06bA	0.15±0.01bB	0.15±0.07bB
2	3.47±0.55aB	5.19±0.45aA	1.36±0.17aB	0.31±0.10aA	0.35±0.10aA	0.26±0.07aA
3	4.09±0.05aA	7.87±0.0.63aB	1.46±0.86aC	0.34±0.19aA	0.45±0.26aA	0.38±0.08aA

同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平，同行数据后不同大写字母表示茬间差异达 1%显著水平。下同。Different small letters in the column indicate significant differences among different greenhouse cultivation years at 5% (Duncan's multiple comparison test). Different capital letters in a line for the same greenhouse cultivation year indicate significant differences among different harvests at 5% level. The same below.

表 3 温室栽培年限对不同茬口番茄吸氮量的影响

Table 3 N uptake of tomato of different harvests in soils with different cultivation years of greenhouse

温室种植年限 Greenhouse cultivation year (a)	地上部分氮素含量 Aboveground N content (%)			根系氮素含量 Root N content (%)			吸氮量 N uptake (mg·pot^{-1})			吸氮总量 Total N uptake (mg·pot^{-1})
	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	第 1 茬 1st harvest	第 2 茬 2nd harvest	第 3 茬 3rd harvest	
0	1.3±0.1bA	0.9±0.1bB	0.8±0.1bB	0.4±0.1bB	1.0±0.1bA	0.4±0.0bB	16.3±0.3bA	10.0±0.5bB	2.6±0.7bC	28.9±0.8b
2	1.5±0.3aB	2.0±0.1aA	1.1±0.1aC	0.8±0.2aB	1.8±0.2aA	0.7±0.1aB	52.4±1.2aB	105.9±2.2aA	15.2±1.8aC	173.5±2.6a
3	1.6±0.3aB	2.1±0.2aA	1.3±0.1aB	0.9±0.2aB	2.0±0.2aA	0.8±0.1aB	67.1±1.3aB	165.3±2.5aA	19.1±1.9aC	251.5±2.9a

(P>0.05)；各生长阶段番茄吸氮量均表现为 2 a 和 3 a 处理显著高于 0 a。且各阶段随栽培年限延长，番茄吸氮量呈增加趋势，但不同生长阶段 2 a 和 3 a 处理间差异未达到显著水平(P>0.05)。

同一栽培年限不同茬相比，0 a 处理地上部分氮素含量第 1 茬是第 2 茬、第 3 茬的 1.4 倍和 1.6 倍，均显著高于第 2 茬和第 3 茬，而 2 a 和 3 a 处理第 2 茬显著高于第 1 茬和第 3 茬；与第 2 茬相比，3 个栽培年限处理均表现为第 1 茬和第 3 茬番茄根系氮素含量显著降低。从番茄吸氮量来看，除 0 a 处理第 3 茬显著低于其余两茬外，2 a 和 3 a 处理均表现为第 2 茬显著高于第 1 茬和第 3 茬。

2.3 栽培年限对土壤养分及矿质氮和可矿化氮的影响

由表 4 可见，与种植前相比，栽培第 2 a 和 3 a 温室土壤 0~20 cm 土层有机质含量分别增加 62.1%和 131.0%，增幅达到极显著水平(P<0.01)。栽培 3 a 的土壤全氮含量显著增加，较种植前增加 67.1%。栽培 3 a 的温室土壤矿质氮、速效磷和速效钾含量也显著增加，增幅平均分别达 621.4%、1445.6%和 146.9%。

土壤初始矿质态氮含量 0 a 为 13.07 mg·kg^{-1}，2 a 和 3 a 与 0 a 相比土壤矿质态氮含量分别增加了 409.10%和 621.42%。采用长期好气培养法测定的 0 a 处理土壤可矿化氮量(好气培养矿化氮)为 41.4 mg·kg^{-1}，2 a 和 3 a 处理土壤可矿化氮量显著增加，分别是 0 a 的 2.84 和 2.96 倍。与 0 a 相比，番茄吸氮量、初始矿质态氮量和可矿化氮量 2 a 和 3 a 处理均显著增加(P<0.05)。

为准确评价不同栽培年限土壤供氮能力，本试验将生物耗竭法得到的番茄吸氮量与土壤初始矿质态氮、全氮、有机质含量和土壤矿化氮累积量进行相关分析。结果(图 1)表明，番茄吸氮量与土壤初始

表 4 不同年限温室土壤的理化性质

Table 4 Physical and chemical properties of soils of greenhouses planted for different years

温室种植年限 Greenhouse cultivation year (a)	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	速效磷 Available P (mg·kg^{-1})	速效钾 Available K (mg·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	矿质氮(铵态氮+硝态氮) Mineral N (NH_4-N+NO_3-N) (mg·kg^{-1})	好气培养矿化氮 Mineralized N (mg·kg^{-1})
0	8.7±0.6C	9.0±2.3C	147±6.4C	0.76±0.03B	13.07±4.01B	41.4±2.2B
2	14.1±3.0B	101.2±22.25AB	286±65AB	1.22±0.32A	66.54±21.62A	117.5±13.1A
3	20.1±5.3A	139.1±46.99A	363±103A	1.27±0.19A	94.29±28.45A	122.7±15.3A

温室种植年限 0 a 的土壤样本为温室建设前的大田土壤，下同。同列数据后不同字母表示处理间差异达 1%显著水平。Soil of greenhouse cultivated for 0 year is from field before greenhouse construction. The same below. Values followed by different letters in a column are significantly different at the 1% level.

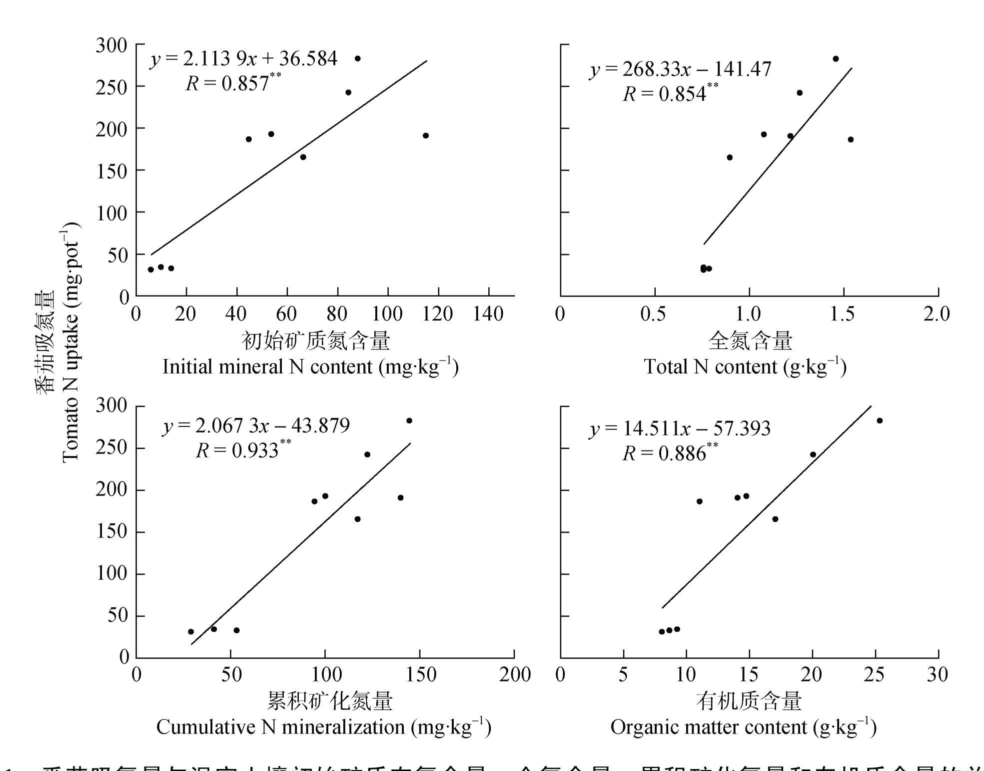


图 1　番茄吸氮量与温室土壤初始矿质态氮含量、全氮含量、累积矿化氮量和有机质含量的关系

Fig. 1　Relationship between N uptake and initial mineral N content, total N content, cumulative N mineralization and organic matter content in soils of greenhouse

矿质氮、全氮含量、累积矿化氮量及有机质呈极显著正相关关系(P<0.01)，相关系数分别为 0.857、0.854、0.933 和 0.886，说明土壤供氮水平取决于土壤初始矿质氮、全氮和有机质含量的大小。

3　讨论

3.1　栽培年限对温室土壤供氮能力的影响

本研究发现，随日光温室栽培年限的增加，番茄株高、茎粗、地上及地下部生物量和叶绿素含量随之增加，这与栽培年限长的温室土壤有机质、全氮和速效养分含量较高有关[16]。采用盆栽生物耗竭法测定的番茄吸氮量及长期间歇好气淋洗法测定土壤可矿化氮量均显著增加。随日光温室栽培年限的增加，番茄吸氮量的增加与新建温室大量施用有机肥提高土壤有机质及全氮含量有关[19–20]。对该研究区域 170 余个日光温室养分投入情况的调查结果发现，有机肥施用量平均为 142 t·hm^{-2}，变化范围为 36~360 t·hm^{-2}，其中超过 120 t·hm^{-2} 的占调查温室的 62%[21]。设施发展较早的山东等地，日光温室有机肥用量更高(177~265.1 t·hm^{-2})[22–23]。长期大量施用有机肥显著提高了土壤有机质和全氮含量[11,16,21,24]。本研究发现，0~20 cm 土壤有机质含量为 8.7~20.1 g·kg^{-1}，随日光温室栽培年限增加有机质含量和全氮含量提高。周博[25]的氮素耗竭试验也表明，施用有机肥明显提高了温室土壤供氮能力。可见，日光温室栽培下长期施肥，特别是施用有机肥显著改善了土壤有机氮库的容量，增加了土壤供氮量[26]。因此，随日光温室栽培年限的增加，在确定氮肥合理推荐量时，应适当降低化学氮肥的用量。

虽然本研究表明，随栽培年限的增加，日光温室土壤供氮能力显著增强，由于本研究仅比较了新建温室前 3 年土壤供氮能力的变化，尚需进一步研究随栽培年限的增加土壤供氮能力的变化特性；另外，在田间栽培条件下，由于土壤温度、水分等环境因素与培养试验存在很大的差异，因此，如何定量减少化学氮肥的用量，尚需开展田间试验进行研究。

3.2　土壤供氮能力的评价方法

作物吸收的氮素同时来源于土壤中的无机态氮和土壤矿化的有机氮。若要全面评价土壤的供氮能力，必须综合考虑土壤初始矿质氮和作物生长期间土壤矿化的氮素[27]。由于土壤可矿化氮与土壤有机质及全氮含量密切相关，因此，测定土壤有机质及全氮含量是评价其供氮水平的简便方法。生物耗竭法和长期间歇好气淋洗法是两种评价土壤供氮能力的经典方法[28]，其中生物耗竭法是评价土壤供氮能力最直接的方法。因此，本研究同时采用盆栽生物耗竭法和长期间歇好气淋洗法对不同年限温室土壤供氮能力进行了评价。结果表明，土壤有机质、全氮、初始矿质氮及累积矿化氮量与番茄吸氮量间呈

极显著正相关关系，说明这些指标均可用于土壤供氮能力的评价。

4 结论

随着新建日光温室栽培年限的延长，番茄各生长指标(株高、茎粗和叶绿素含量)均呈增加趋势，且第 3 年温室土壤有机质、全氮和速效养分含量均显著高于种植前；番茄吸氮量及土壤可矿化氮量显著增加，说明土壤供氮能力显著增强，生产中对栽培年限长的日光温室应适当降低化学氮肥的用量。土壤有机质、全氮、初始矿质氮及累积矿化氮量与番茄吸氮量间呈极显著正相关关系，其中以土壤矿化氮量与番茄吸氮量间的相关系数最大，说明这些指标均可用于土壤供氮能力的评价。

参考文献 References

[1] 李天来．我国日光温室产业发展现状与前景[J]．沈阳农业大学学报, 2005, 36(2): 131–138
Li T L. Current situation and prospects of green house industry development in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131–138

[2] 李俊, 李建明, 曹凯, 等．西北地区设施农业研究现状及存在的问题[J]．中国蔬菜, 2013(6): 24–29
Li J, Li J M, Cao K, et al. Present status and existing problems of studies on protected agriculture in Northwest China[J]. China Vegetables, 2013(6): 24–29

[3] 喻景权．“十一五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]．中国蔬菜, 2011(2): 11–23
Yu J Q. Progress in protected vegetable production and research during ‘The Eleventh Five-Year Plan’ in China[J]. China Vegetables, 2011(2): 11–23

[4] Chen Q, Zhang X S, Zhang H Y, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the beijing region[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69(1): 51–58

[5] He F F, Chen Q, Jiang R F, et al. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicum esculentum* mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in northern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(1): 1–14

[6] Guo R Y, Nendel C, Rahn C, et al. Tracking nitrogen losses in a greenhouse crop rotation experiment in north china using the EU-Rotate_N simulation model[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2218–2229

[7] Liang X S, Gao Y A, Zhang X Y, et al. Effect of optimal daily fertigation on migration of water and salt in soil, root growth and fruit yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in solar-greenhouse[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86975

[8] Sepaskhah A R, Tafteh A. Yield and nitrogen leaching in rapeseed field under different nitrogen rates and water saving irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 112: 55–62

[9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[10] Riya S, Min J, Zhou S, et al. Short-term responses of nitrous oxide emissions and concentration profiles to fertilization and irrigation in greenhouse vegetable cultivation[J]. Pedosphere, 2012, 22(6): 764–775

[11] 刘建霞, 马理, 李博文, 等．不同种植年限黄瓜温室土壤理化性质的变化规律[J]．水土保持学报, 2013, 27(5): 164–168
Liu J X, Ma L, Li B W, et al. Variation of soil physicochemical properties in cucumber greenhouse under different cultivating years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 164–168

[12] Zhao M Q, Shi Y, Chen X, et al. Soil nitrogen accumulation in different ages of vegetable greenhouses[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 8: 21–25

[13] 孙健, 张云贵, 刘青丽, 等．长期调控施肥对京郊保护地土壤无机氮含量及矿化特征的影响[J]．中国土壤与肥料, 2012(2): 8–13
Sun J, Zhang Y G, Liu Q L, et al. Effect of manipulation fertilization on soil inorganic nitrogen and characteristics of mineralization of protected soils in Beijing suburb[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2012(2): 8–13

[14] 闫德智, 王德建．土壤供氮能力研究方法进展[J]．土壤, 2005, 37(1): 20–24
Yan D Z, Wang D J. Methods for studying soil nitrogen supply capacity[J]. Soils, 2005, 37(1): 20–24

[15] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(3): 465–472

[16] Gao J J, Bai X L, Zhou B, et al. Soil nutrient content and nutrient balances in newly-built solar greenhouses in northern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94(1): 63–72

[17] 周博, 陈竹君, 周建斌．水肥调控对日光温室番茄产量、品质及土壤养分含量的影响[J]．西北农林科技大学学报：自然科学版, 2006, 34(4): 58–62
Zhou B, Chen Z J, Zhou J B. Effect of different fertilizer and water managements on the yield and quality of tomatoes and nutrient accumulations in soil cultivated in sunlight greenhouse[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(4): 58–62

[18] Sparks D L. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods[M]. Madison: SSSAbook, 1996

[19] 周德平, 褚长彬, 刘芳芳, 等．种植年限对设施芦笋土壤理化性状、微生物及酶活性的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 459–466
Zhou D P, Chu C B, Liu F F, et al. Effect of asparagu’s cultivation years on physio-chemical properties, microbial community and enzyme activities in greenhouse soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 459–466

[20] 王亚男, 曾希柏, 王玉忠, 等．设施蔬菜种植年限对氮素循环微生物群落结构和丰度的影响[J]．应用生态学报, 2014, 25(4): 1115–1124

Wang Y N, Zeng X B, Wang Y Z, et al. Effects of vegetable cultivation years on microbial biodiversity and abundance of nitrogen cycling in greenhouse soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1115–1124

[21] 白新禄，高佳佳，雷金繁，等. 杨凌新建日光温室番茄施肥现状调查与分析[J]. 西北农业学报, 2013, 22(2): 148–151
Bai X L, Gao J J, Lei J F, et al. Survey of fertilizer application of tomato in new-established greenhouse in Yangling[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(2): 148–151

[22] 曹卫齐，张卫华，陈伟，等. 济南地区日光温室养分投入特征和利用状况的分析[J]. 西南农业学报，2011，24(5): 1818–1827
Cao W Q, Zhang W H, Chen W, et al. Analysis of characteristics of fertilizer input and absorption in Jinan greenhouse[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(5): 1818–1827

[23] 余海英，李廷轩，张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514–522
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 514–522

[24] 曹齐卫，张卫华，李利斌，等. 济南地区日光温室土壤养分的分布状况和累积规律[J]. 应用生态学报，2012，23(1): 115–124
Cao Q W, Zhang W H, Li L B, et al. Distribution and accumulation characteristics of nutrients in solar greenhouse soil in Jinan, Shandong Province of East China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 115–124

[25] 周博. 日光温室栽培下有机肥氮素供应特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
Zhou B. Characteristics of nitrogen supply from manure under solar greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012

[26] 关焱，宇万太，李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 131–137
Guan Y, Yu W T, Li J D. Effects of long-term fertilization on soil nutrient pool[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 131–137

[27] 付会芳，李生秀. 土壤氮素矿化与土壤供氮能力——Ⅱ. 矿化氮量与作物吸氮量的关系[J]. 西北农业大学学报: 自然科学版, 1992, 20(S1): 53–58
Fu H F, Li S X. Soil nitrogen mineralization and soil N-supplying capacities Ⅱ. The relationship between mineralized N and plant uptake N[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 1992, 20(S1): 53–58

[28] 金发会，李世清，卢红玲，等. 石灰性土壤供氮能力几种生物测定方法的评价研究[J]. 中国农业科学，2007，40(7): 1422–1431
Jin F H, Li S Q, Lu H L, et al. Estimation of the biological methods on assessing soil nitrogen-supplying capacity in calcareous soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(7): 1422–1431